

Vazão máxima de projeto versus modelos digitais de terreno: qual é a relação?

Hugo José Ribeiro¹
Wellington Nunes Oliveira¹
Rubens Villar Siqueira¹
Alcides Wesley Nunes de Oliveira²
Victor Tomaz de Oliveira³

1Universidade Federal de Goiás- EECA- UFG
Praça Universitária s/n – Setor Universitário - CEP 74605-220 - Goiânia-GO, Brasil
{ hgribeirogeo, wellington.wno, rubens.villar }@gmail.com

2Faculdade Araguaia – FARA
Av. T-10, nº 1047, Setor Bueno - CEP 74223-060 - Goiânia-GO, Brasil
alcides.awno@gmail.com

3Instituto Federal Goiano - Câmpus Urutaí
Rodovia Geraldo Silva Nascimento Km 2,5 - CEP 75790-000 – Urutaí-GO, Brasil
{vto.professor}@gmail.com

Resumo. Para a elaboração de estudos hidrológicos, é fundamental a existência de um modelo numérico de terreno que represente com acurácia e precisão, o relevo da região de interesse, sendo o mesmo hidrológicamente consistente. Dados obtidos em modelos digitais de terreno são comumente utilizados para derivar feições hídricas que servem como entradas para vários modelos hidrológicos. Estes dados são geralmente usados em modelos chuva-vazão, neste caso o Soil Conservation Service - SCS. Para este trabalho, utilizaram-se cinco superfícies originais, das quais foram geradas outras cinco hidrológicamente consistentes, formando um conjunto de dados com dez superfícies da sub-bacia do Córrego Taquaral, localizadas no município de Goiânia. Os primeiros resultados evidenciam que o processo de consistência hidrológica aplicado às superfícies, tem influência na vazão máxima de projeto. Além disso, as informações extraídas de superfícies de baixa resolução como o SRTM, demonstram maior necessidade de correção hidrológica. Em relação à vazão de pico para a sub-bacia do Córrego Taquaral estudada, houve um aumento de 10,4 m³/s, conforme as características do modelo digital de terreno utilizado, o que serve de alerta aos projetistas quando à consistência dos dados comumente utilizados na elaboração de projetos hidrológicos.

Palavras-chave: hidrologia, modelos hidrológicos, SCS, resolução espacial, vazão de projeto

Abstract. For the elaboration of hydrological studies, it is fundamental the existence of a numerical model of terrain that represents with accuracy and precision, the relief of the region of interest, being the same hydrologically consistent. Data obtained in digital elevation models are commonly used to derive water features that serve as input to various hydrological models. These data are generally used in rainfall flow models, this case the Soil Conservation Service - SCS. For this work, five original surfaces were used, from which five hydrologically consistent ones were generated, forming a dataset with ten surfaces of the sub-basin of the Taquaral Stream, located in the city of Goiania. The first results show that the process of hydrological consistency applied to the surfaces has an influence on the maximum design flow rate. In addition, information extracted from low-resolution surfaces such as SRTM demonstrates a greater need for hydrological correction. In relation to the peak flow rate for the studied Taquaral Stream sub-basin, there was an increase 10.4 m³ / s, according to the characteristics of the digital elevation model used, which serves as an alert to the designers when the data consistency used in the preparation of hydrological projects.

Key-words: hydrology, hydrological models, SCS, spatial resolution, design flow

1. Introdução

Chuvas intensas geram escoamentos superficiais, os quais trazem impactos negativos, quando da ocorrência de enchentes e alagamentos em bacias hidrográficas. Tais impactos podem caracterizar-se por erosões do solo, transporte de sedimentos prejudiciais ao ambiente hídrico, causando redução do armazenamento de água em aquíferos, além de danos à população (Goerl e Kobiyama, 2005; Marques et al., 2018).

A adoção, ou elaboração de modelos hidrológicos é de suma importância quando o sistema real não pode responder às questões formuladas pelo problema em estudo, sendo realçada quando resulta em reduções de tempo, custos ou riscos. Possibilita a obtenção de sistemas idealizados, a previsão do comportamento de um sistema existente em operações não registradas e para condições ainda não ocorridas, permitindo elaborar cenários em diferentes contextos, produzindo resultados importantes para o planejamento urbano (Krauskopf, 2005).

Conforme afirmam Li e Wong (2010), dados obtidos a partir de modelos digitais de terreno são comumente utilizados para derivar feições hidrográficas, que servem de subsídios para os vários modelos hidrológicos. Atualmente, os modelos digitais de terreno, vêm sendo disponibilizados em níveis locais, regionais e globais, a partir de várias fontes e em diferentes níveis de detalhamento (resolução espacial).

É importante destacar que os modelos digitais de terreno podem apresentar inconsistências para a aplicação direta em modelos hidrológicos (Ribeiro, 2015), devendo, portanto, passar por correções, de modo a permitir que as delimitações automáticas das bacias hidrográficas sejam elaboradas com maior precisão. As eliminações das inconsistências dos modelos digitais de terreno devem contemplar a rede de drenagem real mapeada com precisão, além da eliminação de depressões e saliências espúrias no terreno, que possam bloquear o fluxo do escoamento superficial (Martins et al., 2011).

Um dos pontos fundamentais na elaboração de estudos hidrológicos é a existência de um modelo numérico de terreno que represente de maneira consistente, o comportamento do escoamento superficial da região de interesse. Um grave problema recorrente é a dificuldade em se obter a correta caracterização da morfologia da superfície da bacia de contribuição. Estes estudos seriam severamente comprometidos, caso não fossem eliminadas as inconsistências destas superfícies, mantendo-se as condições de altimetria e respeitando-se o traçado da hidrografia mapeada, obtendo-se resultados rápidos e precisos (Rubert et al., 1999).

Estudos (Pires et al., 2005; Chow, 2010; Vesakoski et al., 2014) mostram que o método de aquisição, tamanho da grade do Modelo Digital de Terreno e métodos de processamento, interfere diretamente na acurácia dos parâmetros hidrológicos. Chaplot (2005) e Zhang et al. (2011) verificaram diferenças significativas na produção de sedimentos obtida por meio do modelo SWAT a partir de parâmetros obtidos por meio de MDTs com diferentes tamanhos de célula. Além disso, Chang e Chao (2013) destacam que o pico de vazão no hidrograma de projeto sofre maior influência quando há alteração no tamanho da célula do MDT.

Os parâmetros extraídos de modelos digitais de terreno (MDT) são utilizados, geralmente, em modelos chuva-vazão. Dawod et al. (2011), na Arábia Saudita, após compararem modelos regionais de estimativa de cheias com o método Racional e *Curve Number* (SCS), recomendam a utilização do método *Curve Number* (SCS) por apresentar melhor resultado.

2. Objetivo

Diante disso, este trabalho busca comparar as vazões de pico dos hidrogramas de projeto gerados a partir dos parâmetros extraídos de superfícies digitais de terreno originais e hidrológicamente consistentes, verificando se existe influência da correção hidrológica no hidrograma de projeto, tomando como área de estudo uma sub-bacia do ribeirão Anicuns, localizada na região sudoeste do município de Goiânia.

3. Materiais e Métodos

A área de estudo (**Figura 1**) está localizada na região sudoeste do município de Goiânia, e caracteriza-se por ser uma das sub-bacias que compõem a bacia hidrográfica do ribeirão Anicuns. A sub-bacia do Córrego Taquaral com área de 28 km² é composta por aproximadamente 42% de área urbanizada, e 53% de área verde, distribuída entre vegetação densa e campos. A declividade da bacia varia em torno de 0 a 8% que, segundo a classificação da Embrapa (1979), representa um relevo de plano à suave ondulado. Vale destacar que as técnicas apresentadas aqui podem ser aplicadas tanto em bacias urbanas, como rurais em regiões úmidas, como no pantanal, por exemplo, a depender da disponibilidade de dados hidrológicos na região.



Figura 1 - Localização da área de estudo.

A sub-bacia do Córrego Taquaral é composta por apenas um único tipo de solo, latossolo vermelho amarelo segundo levantamento realizado em todo estado de Goiás por IPLAN/IBGE/UFG (1991). Este tipo de solo é classificado, segundo o método SCS, como sendo do grupo C. Solos pertencentes a este grupo possuem baixa capacidade de infiltração e são pouco profundos, com uma porcentagem considerável de argila.

Na sub-bacia do Córrego Taquaral não há medição de vazão ou de precipitação, no entanto, existem postos pluviométricos no entorno, que possibilitam a estimativa destas informações por meio de modelos chuva-vazão, como será explicado posteriormente.

Foram utilizados como materiais, cinco superfícies com diferentes resoluções espaciais (Lidar 5 metros, Aerofotogrametria 5 metros, GDEM 30 metros, Topodata 30 metros, SRTM 90 metros). Cada superfície foi corrigida, gerando assim, outras cinco superfícies hidrológicamente consistentes. Logo, formou-se o conjunto de dados com dez superfícies. A correção dos modelos numéricos de terreno foi realizada considerando-se a rede de drenagem e posterior eliminação de reentrâncias e saliências espúrias (Ribeiro e Ferreira, 2015).

Posteriormente, extraiu-se a rede de drenagem de forma padronizada para as dez superfícies com o auxílio da extensão ArcHidro no programa ArcGis 9.3. As informações de drenagem de cada superfície foram organizadas separadamente em bancos de dados geográficos, para posterior consulta. Com os dados gerados, extraíram-se os parâmetros (comprimento do talvegue e desnível máximo) necessários para o cálculo do tempo de concentração da bacia a partir da informação de cada superfície (**Figura 2**).

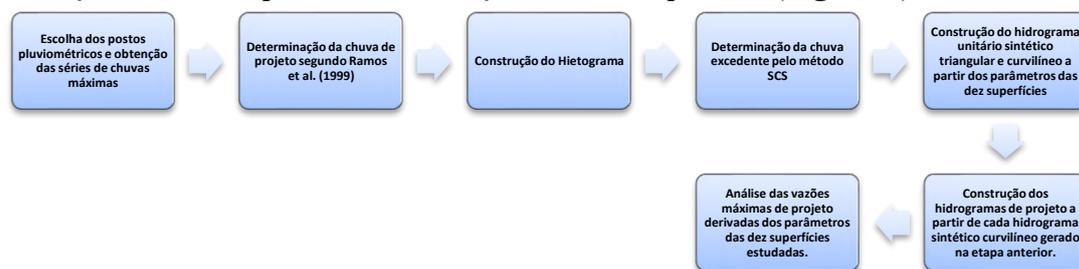


Figura 2 - Método para obtenção do hidrograma de projeto

A escolha dos postos pluviométricos foi influenciada pelo tamanho da série histórica, procuraram-se postos vizinhos à sub-bacia com a maior série histórica possível e em um raio não maior do que 100 km. Portanto, foram escolhidas quatro estações, cujos códigos são: 1649001, 1649002, 1649005, 1649012, todas as estações foram adquiridas do banco de dados hidrológicos da ANA (Hidroweb).

Após a aquisição, os dados foram organizados em planilha Excel de onde foram extraídos os valores de precipitações máximas diárias anuais e obtidos os valores de média e desvio padrão de cada série. Com os valores médios foi elaborado, em ambiente SIG, um mapa de precipitação máxima diária anual média e pela razão entre o desvio padrão e média gerou-se o mapa do coeficiente de variação.

A chuva de projeto foi determinada segundo Ramos et al. (1999) que afirmaram ser possível obter, por meio da Equação 1, uma chuva de duração t horas e período de retorno T num dado local, conhecendo-se o valor médio das chuvas máximas de 1 dia (h_{1d}).

$$h_{t,T} = 0,53 * h_{1d} * (t - 0,10)^{0,242} * (1 + K_T * cv) \quad \text{Equação 1}$$

Em que:

$h_{t,T}$ - chuva de duração t horas e período de retorno T anos (em mm); h_{1d} - valor médio das chuvas máximas de 1 dia (em mm); K_T - fator de frequência para o período de retorno T e tamanho da amostra de n anos; cv - coeficiente de variação; t - duração da chuva (em horas).

A decisão da duração da chuva (t) foi baseada na recomendação de Tomaz (2002), que sugere uma duração da chuva de projeto de aproximadamente 25 a 30% maior que o tempo de concentração. Como o maior tempo de concentração calculado foi de 3,67 horas, optou-se pela duração de 5 horas. Deste modo, calcularam-se as chuvas de projeto para os períodos de retorno de 5, 10, 20, 25, 50 e 100 anos.

Os hietogramas de chuva foram construídos em intervalos de 10 minutos utilizando o 1º quartil das curvas acumuladas de Huff (**Tabela 1**) e as chuvas de projeto já calculadas anteriormente.

Tabela 1 - Cálculo dos valores de Huff para o 1º Quartil com base no tempo da chuva.

Valores da tabela de Huff		Valores interpolados com base na duração da chuva		Valores da tabela de Huff		Valores interpolados com base na duração da chuva	
Curva de Huff para 1º Quartil		t * (COL 1/100)	COL 2 /100	Curva de Huff para 1º Quartil		t * (COL 1/100)	COL 2 /100
% acumulada de tempo	% acumulada de chuva	% acumulada de tempo	% acumulada de chuva	% acumulada de tempo	% acumulada de chuva	% acumulada de tempo	% acumulada de chuva
COL 1 (%)	COL 2 (%)	COL 3 (%)	COL 4 (%)	COL 1 (%)	COL 2 (%)	COL 3 (%)	COL 4 (%)
0	0	0	0	55	84	165	0,84
5	16	15	0,16	60	86	180	0,86
10	33	30	0,33	65	88	195	0,88
15	43	45	0,43	70	90	210	0,9
20	52	60	0,52	75	92	225	0,92
25	69	75	0,69	80	94	240	0,94
30	66	90	0,66	85	96	255	0,96
35	74	105	0,74	90	97	270	0,97
40	75	120	0,75	95	98	285	0,98
45	79	135	0,79	100	100	300	1,00
50	82	150	0,82				

Os valores da coluna 1 e 2 representam respectivamente a porcentagem de tempo e chuva acumulada para o 1º Quartil da **Tabela 1**. Na coluna 3 tem-se a multiplicação do tempo da chuva (t) pela coluna 1 dividido por 100, sendo assim obtêm-se a porcentagem de tempo da chuva determinada por (t), e a coluna 4 que divide os valores da coluna 2 por 100.

É importante considerar que os valores da coluna 4 estão discretizados em intervalos de 15 minutos. Para obter os valores discretizados em intervalo de 10 minutos ou outro tempo qualquer, é preciso utilizar uma operação matemática de interpolação linear. Estes valores interpolados multiplicados pelas chuvas de projeto geram os hietogramas, que são utilizados para extrair a chuva excedente por meio de um modelo chuva-vazão, que nesta pesquisa utilizou-se *Soil Conservation Service* (SCS).

A chuva excedente ou escoamento superficial pode ser determinado segundo Davie (2002) a partir da Equação 2, desenvolvida pelo Ministério de Agricultura dos Estados Unidos e Serviço de Conservação do Solo para modelagem de chuva-vazão. Vale salientar que esta equação tem sido amplamente utilizada pela comunidade científica.

$$Q = \frac{(P-Ia)^2}{P-Ia+S} \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

P= precipitação total em mm; Ia= perdas iniciais.

Estudando os resultados de diversas bacias, o SCS chegou a seguinte relação:

Ia= 0,2 * S, em que o valor de S é dado pela Equação 3,

$$S = \frac{25400}{CN} - 100 \quad \text{Equação 3}$$

Visando eliminar a subjetividade na composição do valor CN da sub-bacia do Córrego Taquaral, buscou-se gerar o mesmo utilizando dados de solos e tipo de solos disponíveis, em ambiente SIG. O mapa de solos adquirido de Nunes (2012) foi georreferenciado e vetorizado, sua escala original é de 1:40.000 para todo estado de Goiás.

O mapa de uso do solo foi construído de forma híbrida, utilizando técnicas de sensoriamento remoto e o Mapa Urbano Digital de Goiânia, que forneceu as camadas de vias e loteamento. Deste modo, uniram-se os dados em um único mapa contendo as classes de uso do solo. A partir daí, determinou-se um valor de CN para cada célula da bacia. A média destes compôs o CN médio usado no cálculo da Equação 3.

Posteriormente, calcularam-se os hidrogramas unitários sintéticos triangulares a partir dos parâmetros extraídos das dez superfícies, originais e hidrológicamente consistentes. O hidrograma formado com o uso deste método foi desenvolvido a partir de bacias agrícolas dos Estados Unidos e tem forma triangular. Inicialmente devem-se determinar alguns parâmetros, conforme roteiro a seguir:

i) Determinar o tempo de concentração (tc) (equação de Kirpich Modificada).	$tc = 1,42 * (L^3 / H)^{0,385}$, em que L= comprimento do talvegue em km; H= desnível máximo em metros.
ii) Determinar o tempo de duração da chuva D (horas),	$D = 0,133 * tc$
iii) Determinar o tempo de retardo tp (horas),	$tp = 0,6 * tc$
iv) Determinar o tempo de pico Tp (horas),	$Tp = tp + (D/2)$, em que tp= tempo de retardo
v) Determinar o tempo de base tb (horas),	$tb = 2,67 * Tp$
vi) Determinar a vazão de pico qp (m ³ /s),	$qp = (2,08 * A) / Tp$, em que A= área da bacia.

O hidrograma unitário sintético curvilíneo é obtido pela multiplicação dos valores de tempo de pico (Tp) e vazão de pico (qp) pelo hidrograma unitário curvilíneo adimensional do SCS, conforme Mockus (1964).

Para gerar o hidrograma de projeto utilizou-se o método matemático chamado convolução, que utiliza a multiplicação, translação e soma para gerar o hidrograma de projeto final (Tomaz, 2002). Em termos práticos, há uma multiplicação do hidrograma unitário sintético curvilíneo pelo hidrograma de chuva excedente. O somatório desta operação fornece o hidrograma de projeto.

3. Resultados e Discussão

Inicialmente foi obtido, o comprimento de talvegue e desnível máximo, para cada um dos dez modelos numéricos de terreno, conforme se pode observar na **Tabela 2**.

Tabela 2 - Dados extraídos das superfícies digitais, em que: L= comprimento do talvegue em km e H= o desnível máximo em m.

		Aerofotogrametria	Lidar	GDEM	Topodata	SRTM
L (km)	original	10,9	11,4	11,3	10,4	10,5
	corrigido	10,9	10,9	10,3	10,3	10,4
H (m)	original	137,0	125,5	159,0	140,5	148,0
	corrigido	158,6	130,0	133,0	143,0	180,7

Nota-se que as maiores diferenças encontradas entre as superfícies originais e hidrológicamente consistentes encontram-se no parâmetro H. Este, por sua vez, interfere diretamente na declividade do curso d'água, que é um dos parâmetros principais em várias

equações do tempo de concentração em uma bacia. Em seguida partiu-se para o cálculo das chuvas de projeto.

A partir da interpolação dos registros de quatro pluviômetros localizados nas proximidades da área de estudo obteve-se uma chuva máxima média de 83,3 mm e um coeficiente de variação de 0,26. A metodologia proposta por Ramos et al. (1999) possibilitou a geração das chuvas máximas de projeto, com duração de cinco horas e períodos de retorno de 5, 10, 20, 25, 50, 100 anos respectivamente, conforme a **Tabela 3**.

Tabela 3 - Chuvas de projeto com duração de cinco horas e respectivos períodos de retorno, em que: T é o período de retorno em anos e h t, T é a chuva máxima de t anos e T período de retorno em mm.

CHUVAS DE PROJETO PARA DIVERSOS PERÍODOS DE RETORNO COM DURAÇÃO DE 5 h						
T (anos)	5	10	20	25	50	100
h t, T (mm)	149,2	233,5	402,1	486,4	908,0	1751,1

A **Tabela 4** apresenta a distribuição espacial das chuvas de projeto da **Tabela 3** por meio do hietograma de Huff 1º quartil com 50% de probabilidade, com cinco horas de duração e intervalo de dez minutos, com seus respectivos períodos de retorno.

Tabela 4 - Hietogramas de projeto com 300 minutos de duração e períodos de retorno entre 5 e 100 anos.

Tempo (min) >>>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	
Período de retorno (anos)	5	0.0	16.4	15.9	16.9	9.9	9.4	9.0	16.9	7.0	0.0	8.0	4.5	1.0	4.0	3.5	3.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	10	0.0	25.7	24.9	26.5	15.6	14.8	14.0	26.5	10.9	0.0	12.5	7.0	1.6	6.2	5.4	4.7	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1
	20	0.0	44.2	42.9	45.6	26.8	25.5	24.1	45.6	18.8	0.0	21.4	12.1	2.7	10.7	9.4	8.0	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4
	25	0.0	53.5	51.9	55.1	32.4	30.8	29.2	55.1	22.7	0.0	25.9	14.6	3.2	13.0	11.3	9.7	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
	50	0.0	99.9	96.9	102.9	60.5	57.5	54.5	102.9	42.4	0.0	48.4	27.2	6.1	24.2	21.2	18.2	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1
	100	0.0	192.6	186.8	198.5	116.7	110.9	105.1	198.5	81.7	0.0	93.4	52.5	11.7	46.7	40.9	35.0	23.3	23.3	23.3	23.3	23.3	23.3	23.3	23.3	23.3	23.3	23.3	23.3	23.3	23.3	23.3

O parâmetro CN da bacia hidrográfica de estudo foi determinado de forma ponderada a partir do processamento de dados matriciais, com resolução espacial de 5 metros. Sendo assim, cada célula da bacia armazenou um valor de CN e a média destes gerou um CN médio de 82,9 utilizado nos cálculos.

Os elevados valores de CN encontrados na bacia comprovam o seu alto índice de urbanização, percebe-se que a maior parte da bacia é composta pelos valores de 70, 74, 90 e 98, que juntos correspondem a 26,4 km² de um total de 28 km², ou seja, 94,5 % da área. De posse desta informação e do hietograma de projeto já calculado, partiu-se para determinação da chuva excedente por meio do método SCS.

Para determinação da precipitação excedente utilizou-se o período de retorno de cinco anos, pois o foco deste trabalho foi analisar as diferenças encontradas na vazão de pico e volume dos hidrogramas de projeto gerados a partir dos dados de dez superfícies digitais. Portanto, apenas um período de retorno foi utilizado. Na **Tabela 5** é possível visualizar o escoamento superficial produzido pelo hietograma de chuva.

Conforme a **Tabela 4**, uma chuva de 149,2 mm produziu um escoamento superficial de 100,7 mm com 48,5 mm de perdas para a sub-bacia do Córrego Taquaral em questão. Do total precipitado 67,5% escoou superficialmente. Um valor coerente com as condições de uso e tipo de solos encontrados na sub-bacia.

Nunes (2012) detectou um elevado índice de escoamento superficial, em torno de 73,5%, para um total de chuva de 108,6 mm com 24 horas de duração. A autora atribui tal fato às características naturais do solo e à impermeabilização do terreno na bacia hidrográfica do ribeirão Anicuns.

Tabela 5 - Chuva excedente produzida a partir do hietograma de projeto da tabela 4, com período de retorno de 5 anos e duração de 5 horas.

t (min)	P total (mm)	P acum (mm)	Pe acum (mm)	Pe (mm)	Perdas (mm)	t (min)	P total (mm)	P acum (mm)	Pe acum (mm)	Pe (mm)	Perdas (mm)
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	150	3,0	122,3	76,2	2,7	0,3
10	16,4	16,4	0,6	0,6	15,8	160	2,0	124,3	77,9	1,8	0,2
20	15,9	32,3	6,4	5,8	10,1	170	2,0	126,3	79,7	1,8	0,2
30	16,9	49,2	16,5	10,0	6,9	180	2,0	128,3	81,5	1,8	0,2
40	9,9	59,2	23,5	7,0	3,0	190	2,0	130,3	83,3	1,8	0,2
50	9,4	68,6	30,6	7,1	2,3	200	2,0	132,3	85,2	1,8	0,2
60	9,0	77,6	37,7	7,1	1,9	210	2,0	134,3	87,0	1,8	0,2
70	16,9	94,5	51,7	14,1	2,8	220	2,0	136,2	88,8	1,8	0,2
80	7,0	101,4	57,7	6,0	1,0	230	2,0	138,2	90,6	1,8	0,2
90	-3,0	98,5	55,1	-2,6	-0,4	240	2,0	140,2	92,4	1,8	0,2
100	8,0	106,4	62,0	6,9	1,0	250	2,0	142,2	94,2	1,8	0,2
110	4,5	110,9	66,0	3,9	0,5	260	1,5	143,7	95,6	1,4	0,1
120	1,0	111,9	66,9	0,9	0,1	270	1,0	144,7	96,5	0,9	0,1
130	4,0	115,9	70,4	3,5	0,5	280	1,0	145,7	97,4	0,9	0,1
140	3,5	119,3	73,5	3,1	0,4	290	1,5	147,2	98,8	1,4	0,1
						300	2,0	149,2	100,7	1,8	0,2
Σ =							149,2		100,7	48,5	

A construção do hidrograma unitário sintético curvilíneo depende das vazões e tempos de pico relacionados com os parâmetros físicos da sub-bacia do Córrego Taquaral. Deste modo gerou-se a partir dos dados de cada superfície um hidrograma unitário sintético triangular, e com os dados de vazão e tempo de pico construiu-se o hidrograma unitário sintético curvilíneo do SCS. A **Tabela 6** mostra os valores das características do hidrograma unitário sintético triangular, extraídos de cada superfície, originais e hidrológicamente consistentes.

Tabela 6 - Valores calculados a partir das características do talvegue e área da sub-bacia do Córrego do Taquaral para cada superfície.

	Aerofotogrametria		GDEM		Lidar		SRTM		Topodata	
	Original	Corrigido	Original	Corrigido	Original	Corrigido	Original	Corrigido	Original	Corrigido
tc (h)	3,37	3,19	3,32	3,19	3,67	3,44	3,13	2,87	3,16	3,11
D (h)	0,45	0,42	0,44	0,42	0,49	0,46	0,42	0,38	0,42	0,41
tp (h)	2,02	1,91	1,99	1,92	2,20	2,06	1,88	1,72	1,90	1,86
Tp (h)	2,25	2,12	2,21	2,13	2,45	2,29	2,09	1,91	2,11	2,07
tb (h)	6,00	5,67	5,91	5,69	6,54	6,12	5,58	5,11	5,63	5,53
qp (m ³ /s)	26,19	27,71	26,61	27,65	24,04	25,67	28,17	30,76	27,92	28,43

Nota-se que a maior diferença está na vazão de pico, que varia entre 0,51 m³/s a 2,59 m³/s. A superfície Topodata demonstra maior consistência hidrológica, enquanto a superfície SRTM apresenta uma maior necessidade de correção antes da extração da rede de drenagem.

Com base nestes parâmetros e a chuva excedente calculou-se o hidrograma de cheia pelo processo de convolução. No total, foram gerados 10 hidrogramas de cheia, considerando os parâmetros extraídos de cinco superfícies, sendo que, para cada uma destas, comparou-se o hidrograma gerado a partir dos parâmetros da superfície original e hidrológicamente consistente ou corrigido (**Tabela 7**).

Tabela 7 - Diferença entre vazões máximas de projeto calculadas e tempo de concentração.

		L (km)	H (m)	tc (h)	Δtc (h)	Q (m ³ /s)	ΔQ (m ³ /s)
Aerofotogrametria	original	10,90	137,00	3,37	0,18	176,46	6,31
	corrigido	10,90	158,60	3,19			
Lidar	original	11,40	125,50	3,67	0,23	167,36	7,02
	corrigido	10,90	130,00	3,44			
GDEM	original	11,30	159,00	3,32	0,12	177,77	2,51
	corrigido	10,30	133,00	3,19			
Topodata	original	10,40	140,50	3,16	0,06	183,46	2,02
	corrigido	10,30	143,00	3,11			
SRTM	original	10,50	148,00	3,13	0,26	184,38	10,44
	corrigido	10,40	180,70	2,87			

ΔQ= diferença entre as vazões calculadas em m³/s; Q= vazão máxima de projeto em m³/s; Δtc= diferença do tempo de concentração em min; L= comprimento do talvegue em km; H= desnível máximo em m.

Considerando as resoluções espaciais das superfícies estudadas, nota-se uma tendência em relação às diferenças das vazões máximas calculadas. Os hidrogramas gerados a partir dos

dados extraídos pelas superfícies de alta resolução (Aerofotogrametria 5m, Lidar 5m) tiveram resultados similares, assim como (GDEM 30m, Topodata 30m), a maior diferença foi do SRTM com 90 metros de resolução.

Outro aspecto observado entre as vazões máximas derivadas das superfícies corrigidas de alta resolução foi o aumento de 8,4 m³/s do dado Lidar para Aerofotogrametria. É válido destacar que dado Lidar foi originalmente produzido com 1 metro de resolução espacial, e posteriormente sofreu uma generalização para 5 metros no intuito de viabilizar os processamentos computacionais.

Dentre todas as superfícies analisadas pode-se inferir que a redução da resolução espacial afeta o comportamento final do hidrograma de projeto. Ainda da **Tabela 7**, percebe-se que a vazão máxima aumenta conforme a resolução espacial diminui, tanto para superfícies originais quanto para as corrigidas. A amplitude de vazão máxima entre as superfícies foi de 20,4 m³/s, sendo o menor valor encontrado derivado da superfície Lidar e o maior da superfície SRTM.

Houve um aumento em todas as vazões máximas de projeto derivadas de superfícies hidrológicamente consistentes em relação às originais, ou seja, utilizadas sem nenhum tratamento específico. Os resultados demonstrados aqui se referem a uma sub-bacia de características de relevo plano a levemente ondulado.

5. Conclusão e Sugestões

Com os resultados obtidos, foi possível compreender a relação entre os parâmetros físicos extraídos a partir de superfícies digitais de terreno e a sua influência no hidrograma de projeto. Foi possível observar que, o processo de consistência hidrológica aplicado às superfícies teve influência na vazão máxima de projeto.

As informações extraídas de superfícies de baixa resolução como o SRTM, que geralmente é uma das mais utilizadas pelo fácil acesso e gratuidade, demonstraram uma maior necessidade de correção hidrológica. Entende-se que os resultados aqui expostos, servem como alerta aos projetistas no sentido de orientá-los no início do processo que leva à vazão máxima de projeto, corroborando para uma melhor acurácia nos resultados e assim evitando um sub ou superdimensionamento das obras hidráulicas de uma dada bacia.

A importância do tratamento de superfícies digitais para uso em hidrologia ainda é pouco discutida na literatura técnica. Sugere-se que outros autores repliquem esta pesquisa em bacias com diferentes características e, se possível, com dados de vazão para que se possam validar os resultados.

6. Referências

- Chang, C. L.; Chao, Y. C. Effects of spatial data resolution on runoff predictions by the BASINS model. **International Journal of Environmental Science and Technology**, p. 1-8, 2013.
- Chaplot, V. Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment, and NO₃-N loads predictions. **Journal of Hydrology**, v. 312, n. 1, p. 207-222, 2005.
- Chow, T. V. **An Assessment of Hydrologic Enforcement Methods on Various Drainage Features**. Proceedings of the Sixth International Conference of Geographic Information Science. 2010.
- Davie, T. **Fundamentals of Hydrology**: Routledge Fundamental of Physical Geography. 2002.

Dawod, G. M.; Mirza, M. N.; AL-GHAMDI, K. A. Assessment of several flood estimation methodologies in Makkah metropolitan area, Saudi Arabia. **Arabian Journal of Geosciences**, p. 1-9, 2013.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). In: **Reunião Técnica De Levantamento De Solos**, 10., 1979, Rio de Janeiro. Súmula... Rio de Janeiro, 1979. 83 p. (EMBRAPA-SNLCS. Micelânea, 1).

Goerl, R. F.; Kobiyama, M.. **Considerações sobre as inundações no Brasil**. XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005.

IPLAN – Instituto de planejamento Municipal / IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística/ UFG – Universidade Federal de Goiás. Mapa de Solos. **Carta de Risco de Goiás**. Goiânia, 1991.

Li, J.; Wong, D.W.S. **Effects of DEM sources on hydrologic applications**. Computers, Environment and urban systems, v. 34, n. 3, p. 251-261, 2010.

Marques, G. B.; Silva, T. S.; Moura, M. O. Ocorrências de desastres naturais nos principais arranjos populacionais da Sub-região Leste do Nordeste brasileiro. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 4, p. 31-45, 2018.

Martins, V.S.; Guedes, H.A.S.; Capobianco, G.V.; Demetrius, D.S. **A importância do condicionamento hidrográfico no estudo morfométrico de bacias**. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p. 5418

Mockus, V. **National Engineering Handbook**. 1964.

Nunes, F. G. **Modelagem hidrológica e técnicas de geoprocessamento na estimativa da impermeabilização do solo e escoamento superficial da bacia hidrográfica do ribeirão Anicuns-Goiânia (GO)**. Ateliê Geográfico, v. 6, n. 2, 2012.

Pires, J. M. et al. Análise da exatidão de diferentes métodos de interpolação para geração de modelos digitais de terreno e obtenção de características morfométricas em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 2, p. 39-47, 2005.

Ramos, C. L.; Barros, M. T. L.; Palos, J. C. F. **Diretrizes básicas para projetos de drenagem urbana no município de São Paulo**. São Paulo: Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica, 1999.

Ribeiro, H. J. **Análise da consistência de dados hidrológicos a partir de diferentes modelos digitais de terreno**. 2015. 136 p. (UFG-PPGEMA). Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia. 2015.

Ribeiro, H. J.; Ferreira, N. C. Análise Comparativa de Redes Hidrológicas Geradas a Partir de Superfícies Hidrológicamente Consistentes. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 20, n. 4, 2014.

Rubert, O.A.; Ribeiro C. A. A. S.; Chaves M. A. "Um novo divisor de águas na geração de modelos digitais de terreno hidrológicamente consistentes." Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos 13 (1999).

Tomaz, P. Cálculos hidrológicos e hidráulicos para obras municipais: piscinões, galerias, bueiros, canais; métodos SCS, Denver, Santa Bárbara, Racional, TR-55. **Navegar**, 2002.

Vesakoski, J. M. et al. Nationwide Digital Terrain Models for Topographic Depression Modelling in Detection of Flood Detention Areas. **Water**, v. 6, n. 2, p. 271-300, 2014.

Zhang, H. et al. Uncertainty assessment of climate change impacts on the hydrology of small prairie wetlands. **Journal of hydrology**, v. 396, n. 1, p. 94-103, 2011.